

Beschreibung

Verfahren und Vorrichtung zur Ionenstrahlbearbeitung von Oberflächen

Technisches Gebiet

- 5 Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Ionenstrahlbearbeitung der Oberfläche eines Substrates, bei dem das Substrat gegenüber einem Ionenstrahl, der von einer Ionenstrahlquelle erzeugt wird, positioniert wird, und das bekannte Eigenschaftsmuster der Oberfläche des Substrates
- 10 durch den Ionenstrahl mit einem definierten Wirkungsmuster partiell derart bearbeitet wird, dass ein neues technologisch definiertes Eigenschaftsmuster der Oberfläche ausgebildet wird. Weiterhin betrifft die Erfindung eine Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach Anspruch 2.
- 15 Dabei werden unter Eigenschaftsmuster der Oberfläche eines Substrates alle die auf definierte Flächenbereiche der Oberfläche eines Substrates bezogenen physikalischen und chemischen Eigenschaften sowie die Oberflächentopografie verstanden. Das Wirkungsmuster des Ionenstrahls beinhaltet
- 20 die auf definierte Flächenbereiche des Substrates, auf denen die Ionen eines Ionenstrahls einwirken, bezogenen örtlichen Ionenstromdichteverteilungen mit entsprechender Ionenenergieverteilung.

Stand der Technik

Nach dem Stand der Technik sind Verfahren und Einrichtungen bekannt, bei denen ein Ionenstrahl mit konstanter Strahlcharakteristik mit variabler Geschwindigkeit gegenüber der zu bearbeitenden Oberfläche eines Substrates bewegt wird. Mit der Strahlcharakteristik wird die Ionenbeschleunigung, die Ionenenergieverteilung, die Ionenstromdichte und die Ionendichteverteilung des Ionenstrahls Ionenstrahlquelle beschrieben. Auch der Einsatz von Blenden zwischen der Ionenstrahlquelle und dem Substrat ist bekannt.

Besonders für die Mikro- und Nanotechnologien in verschiedenen Branchen ist die Bearbeitung der Oberflächentopographie eines Substrates von entscheidender Bedeutung. Sowohl die Fertigung gezielt einstellbarer Schichtdicken durch das Abdünnen von Schichten in der Dünnschichttechnologie, bis hin zum gezielten Abtrag einzelner Atomlagen, als auch die Nano-Profilierung von "high-grade" Oberflächen erfordern dafür zunehmend den Einsatz von Ionenstrahlen als Arbeitswerkzeug.

Neben der geometrischen Änderung der Oberflächentopographie im Sinne von Abtragen oder Beschichten ist für die Mikro- und Nanotechnologien auch die lokale Änderung der Eigenschaften der Oberfläche von Bedeutung. So ist bekannt, dass bei Ionenstrahlgestützten Abscheidungsverfahren durch das gleichzeitige Auftreffen von Ionen während der Beschichtung auf dem Substrat die Eigenschaften der abgeschiedenen Schicht beeinflusst werden. Damit kann z.B. die Dichte der abgeschiedenen Schicht variiert werden oder das Wachstum der Schicht von amorph zu kristallin geändert oder auch die Stöchiometrie der Schicht beeinflusst werden.

Auch die gezielte Modifikation von Oberflächen ist durch den Ionenbeschuss der Oberfläche möglich. Hier sollen nur das Aufbrechen von funktionellen Gruppen an der Oberfläche von Plastikmaterialien, z.B. zur Veränderung von Hafteigen-
5 schaften, und das Einbringen von Fremdatomen, z.B. zur Oberflächenhärtung, genannt werden.

Die DE 198 14 760 A1 beschreibt z.B. ein Verfahren zur Ionenstrahlbearbeitung von Festkörperoberflächen bei rechteckigem Strahlquerschnitt. Dabei wird die Ionenstrahlquelle
10 unter einen in der Werkstückoberfläche liegenden vorzuziehenden Anfangswinkel mit translatorischer unter Geschwindigkeitsvariation in Abhängigkeit von der Position, Ionenstrahlparameter und Materialeigenschaften in einem bestimmten festen oder variablen Abstand rechnergesteuert über das
15 Werkstück gesteuert.

Darstellung der Erfindung

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren zur Ionenstrahlbearbeitung von Oberflächen der eingangs genannten Art anzugeben, mit dem eine hohe Effektivität erreicht
20 wird und der technische Aufwand gering ist. Weiterhin besteht die Aufgabe eine Einrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach Anspruch 2 anzugeben.

Die Erfindung löst die Aufgabe für das Verfahren durch die im Anspruch 1 angegebenen Merkmale. Für die Einrichtung
25 wird die Aufgabe durch die im Anspruch 6 angegebenen Merkmale gelöst. Vorteilhafte Weiterbildungen der Erfindungen sind in den jeweiligen Unteransprüchen gekennzeichnet und werden nachstehend zusammen mit der Beschreibung der bevorzugten Ausführung der Erfindung, einschließlich der Zeich-
30 nung, näher dargestellt.

Der Kern der Erfindung besteht im neuartigen Einsatz des Ionenstrahls, indem die technologisch erforderliche Wirkung des Ionenstrahles auf der Oberfläche des Substrates mittels Veränderung der Strahlcharakteristik und/oder durch Pulsung
5 des Ionenstrahles in Abhängigkeit des bekannten Eigenschaftsmusters der Oberfläche und des herzustellenden neuen technologisch definierten Eigenschaftsmusters der Oberfläche in Abhängigkeit des Verfahrensfortschrittes eingestellt wird. Dabei wird das aktuelle geometrische Wirkungsmuster
10 des Ionenstrahls auf der Oberfläche des Substrates jeweils an das aktuell bekannte Eigenschaftsmuster der Oberfläche angepasst. Die Eigenschaftsänderung definierter Oberflächenbereiche durch den Ionenstrahl wird danach durch eine zeitlich gesteuerte Strahlcharakteristik bestimmt.

15 Erfindungsgemäß kann die Ionenstrahlquelle und damit der Ionenstrahl gegenüber der zu bearbeitenden Oberfläche eines Substrates fixiert sein oder in einer Weiterbildung entsprechend Anspruch 2 auch bewegt werden.

Geeignete Verfahren und Einrichtungen zum Erfassen des
20 Eigenschaftsmusters der Oberfläche des Substrates und zur in-situ Erfassung des aktuellen Wirkungsmusters des Ionenstrahls zur Veränderung der Ionenstrahlcharakteristik während des Verfahrensablaufes sind nach dem Stand der Technik bekannt.

25 Insbesondere für die Bearbeitung größerer Substrate oder Substratanordnungen ist es vorteilhaft, entsprechend Anspruch 3 mindestens zwei Einzel-Ionenstrahlquellen kombiniert anzuordnen, derart dass die Einzel-Ionenstrahlen gemeinsam das geometrische Wirkungsmuster des erfindungs-
30 gemäßen Ionenstrahls ausbilden.

Der Ionenstrahl oder die Einzel-Ionenstrahlen können nach Anspruch 3 auch zeitgleich oder zeitlich versetzt gepulst werden. Dabei kann die Pulsfrequenz, Pulshöhe sowie die Pulsdauer entsprechend den technischen Gegebenheiten frei
5 programmiert werden.

Für spezifische Aufgaben kann entsprechend Anspruch 4 der Winkel zwischen der Flächennormalen der zu bearbeitenden Oberfläche des Substrates und der Achse des auf die Oberfläche auftreffenden Ionenstrahls auch verändert werden.

10 Für eine definierte reproduzierbare Ionenstrahlbearbeitung ist die Kenntnis der Strahlcharakteristik in Abhängigkeit von bestimmten Steuerparametern der Ionenstrahlquelle sowie die zeitliche Stabilität der Strahlcharakteristik entscheidend.

15 Zur Erfassung des Ionenstrahls auf der Oberfläche des Substrates vor und/oder während des Verfahrensablaufes ist es vorteilhaft, entsprechend Anspruch 5 in der Ebene der zu bearbeitenden Oberfläche des Substrates ein Ionensondenarray anzuordnen, mit dem die geometrische Wirkung des
20 Ionenstrahls gemessen wird.

Damit kann zu jeder Zeit die momentane Strahlcharakteristik bestimmt werden und in der Folge, wenn nötig, im erforderlichen Umfang korrigiert werden. Dabei ist auch eine automatische Regelung zur Korrektur der Strahlcharakteristik
25 oder eine Nebenrechnung der Verfahrensbedingungen des Substrates zur Erreichung des Zielmusters möglich.

Zur Durchführung der Ionenstrahlbearbeitung der Oberfläche eines Substrates nach einem der erfindungsgemäßen Verfahren, bei dem Substrat und Ionenstrahlquelle zueinander

bewegt werden, wird eine Vorrichtung nach Anspruch 6 angegeben. Die Vorrichtung ist innerhalb einer Vakuumkammer angeordnet und beinhaltet einen Substratträger zur Halterung mindestens eines Substrates, der in einer Y-Achse und einer X-Achse bewegt werden kann. Die Ionenstrahlquelle ist in der Wand der Vakuumkammer derart gehaltert, dass die Achse eines Ionenstrahls von der Ionenstrahlquelle senkrecht zur zu bearbeitenden Oberfläche des Substrates in der Z-Achse steht oder in einem zur Z-Achse geneigten Achse angeordnet werden kann. Der Abstand der Ionenstrahlquelle von der zu bearbeitenden Oberfläche des Substrates kann fest oder veränderlich sein.

In einer Weiterbildung der Vorrichtung kann die Ionenstrahlquelle aus mindestens zwei einzelnen Ionenstrahlquellen bestehen, deren einzelne Ionenstrahlen auf der Oberfläche des Substrates ein gemeinsames aktuelles geometrisches Wirkungsmuster des Ionenstrahls ausbilden.

Mit dem erfindungsgemäßen Verfahren sowie der zugehörigen Vorrichtung können gegenüber dem Stand der Technik wesentliche Vorteile erzielt werden. Bei einer Vielzahl insbesondere kleinerer Substrate oder Substratanordnungen sind keinerlei aufwändige Bewegungseinrichtungen oder Blenden erforderlich. Ist technologisch bedingt eine Bewegung zwischen Substrat und Ionenstrahlquelle erforderlich, dann ist es meist ausreichend, eine gleichförmige Bewegung vorzusehen, die ebenfalls wesentlich einfacher realisiert werden kann als eine translatorische Bewegung unter Geschwindigkeitsvariation.

Die Anordnung von Substrat und Ionenstrahlquelle zueinander kann auch rasterförmig erfolgen. Das kann auch in Kombination mit einer Pulsung des Ionenstrahles sehr vorteilhaft

sein, z.B. wenn eine Vielzahl von Substraten, im Durchlaufverfahren bearbeitet werden soll.

Wird z.B. bei zeitlich stabiler Strahlcharakteristik der Ionenstrahl in einem zeitlich veränderlichen Zeitraster
5 mittels elektrischer Steuerparameter zu- und abgeschaltet, so kann bei gleichzeitiger gleichförmiger Substratbewegung eine von der örtlichen effektiven Einwirkungsdauer des Ionenstrahls abhängige Oberflächenbearbeitung erreicht werden. Auch bei der zeitlich veränderlichen Strahlcharakteristik der Ionenstrahlquelle während der gleichförmigen
10 Substratbewegung kann der Ionenstrahl in einem zeitlich veränderlichen Zeitraster zu und abgeschaltet werden. Gleichzeitig zu der veränderlichen Strahlcharakteristik und der Pulsung der Steuergrößen der Ionenstrahlquelle ergibt
15 sich die Möglichkeit der Ionenstrahlneutralisation. Dabei wird während der Sperrung des Ionenstrahls eine Elektronenextraktion durchgeführt.

Mit einer derartigen Verfahrensführung kann eine besonders flexible Ionenstrahlbearbeitung auch bei unterschiedlichen
20 Substratmaterialien erreicht werden, z.B. wenn innerhalb der Substratoberfläche unterschiedliche Eigenschaftsbereiche mit stark abweichenden Abmessungen erzeugt werden sollen. Durch die zeitlich veränderliche Strahlcharakteristik kann die Genauigkeit der Bearbeitung und auch die
25 Bearbeitungsgeschwindigkeit vorteilhaft an das zu erreichende örtliche Eigenschaftsmuster angepasst werden.

Die Erfindung wird nachstehend in einem Ausführungsbeispiel näher erläutert.

Die Zeichnung zeigt in den Figuren 1a und 1b ein Substrat
30 mit einer Beschichtung, wobei Figur 1a die Beschichtung vor

und Figur 2 nach einer Ionenstrahlbearbeitung zeigen. Figur 2 zeigt eine Vorrichtung zur Ionenstrahlbearbeitung des Substrates nach Figur 1a und 1b.

Ausführungsbeispiel I

5 Ausgehend von einem Substrat 8, bestehend aus einem Grundkörper 17, auf dem eine Schicht 18 mit einer Oberfläche 15 entsprechend Figur 1a vorhanden ist, soll die Oberfläche 15 mit einem erfindungsgemäßen Verfahren und der erfindungsgemäßen Einrichtung nach Figur 2 derart bearbeitet werden,
10 dass eine geglättete Oberfläche 16 der dann neuen Schicht 19 entsprechend Figur 1b erzeugt wird.

Die erfindungsgemäße Vorrichtung entsprechend Figur 2 besteht im Wesentlichen aus einem Substratträger innerhalb einer nicht dargestellten Vakuumkammer sowie einer Ionenstrahlquelle 1, die mittels eines Vakuumflansches in der
15 Wand der Vakuumkammer gehaltert ist, derart dass die erforderlichen Steuerelemente sich weitgehend außerhalb der Vakuumkammer befinden.

Der Substratträger besteht aus einer Montageplatte 2, auf
20 der eine Führungsschiene 3 mit einer Y-Achse 4 gehaltert ist, einer auf der Führungsschiene 3 in der Y-Achse 4 verschiebbaren Führungsschiene 5 mit einer X-Achse 6 sowie einem Substrathalter 7, der auf der X-Achse 6 verschoben und um seine eigene zentrische Achse (Z-Achse 11) gedreht
25 werden kann. Auf dem Substrathalter 7 ist das Substrat 8 gehaltert.

In der Ebene des Substrates 8 ist am Substrathalter 7 ein Ionensondenarray 9 vorgesehen, welches aus 2 Spalten mit je 8 Ionensonden besteht und mit dem Substrathalter 7 bewegt

wird. Das Ionensondenarray 9 ermöglicht ohne Unterbrechung des Vakuums eine schnelle und sichere Kontrolle und Vermessung der Strahlcharakteristik in Abhängigkeit von Steuerparametern der Ionenstrahlquelle 1.

- 5 Die Ionenstrahlquelle 1 besteht in bekannter Weise aus den erforderlichen elektrischen Elementen zur Erzeugung eines Ionenstrahls mit definierter geometrischer Strahlcharakteristik, der die Ionenstrahlquelle 1 an der Ionenaustrittsöffnung 10 verlässt. Zur Verschiebung der Ionenstrahlquelle
10 1 in der Z-Achse 11 weist die Z-Achse 11 außerhalb der Vakuumkammer einen Motor 12 mit entsprechendem Getriebe auf. Eine zugehörige Steuereinheit ist in der Zeichnung nicht dargestellt.

- Mit der Vorrichtung nach Figur 2 kann das Substrat 8 gegen-
15 über der Ionenstrahlquelle 1 in beliebiger Weise programmiert bewegt werden.

- Alle wichtigen Gitterspannungen der Ionenstrahlquelle 1 können entsprechend den technischen Möglichkeiten auch gepulst werden. Dadurch ist sowohl eine vollständige zeit-
20 liche Sperrung des Ionenstrahls während der Ionenstrahlbearbeitung als auch eine zeitlich abgestimmte Variation möglich, wobei die Periodendauer als auch die Pulsdauer in einem weiten Bereich frei veränderbar sind.

- Das Vakuumpumpsystem, die Gasversorgungen, einschließlich
25 für reaktive Gase, sowie Vorrichtungen zur Temperierung bzw. Kühlung einzelner Baugruppen oder des Substrates 8 komplettieren die Vorrichtung.

Nachfolgend soll die Vorrichtung in der Anwendung näher beschrieben werden. Die Oberfläche 15 der Schicht 18 nach

Figur 1a soll entsprechend vorgegebener technologischer Parameter eingeebnet werden, so dass die Oberfläche 16 auf der dann neuen Schicht 19 entsprechend Figur 1b ausgebildet wird.

- 5 Bei dem Grundkörper 17 des Substrates 8 handelt es sich im Beispiel um einen Siliziumwafer und als Schicht 18 ist eine Aluminiumschicht vorhanden. Der Durchmesser des Substrates 8 beträgt 150 mm. Die mittlere Schichtdickenhomogenität der aufgetragenen Aluminiumschicht beträgt ca. +/- 10% bei
10 einer mittleren Schichtdicke von ca. 500 nm. Die ursprüngliche Rauigkeit 13 der Oberfläche (Figur 1a) soll auf eine definierte Rauigkeit 14 verringert werden (Figur 1b).

- Das lokale Schichtdickenprofil wird dabei zunächst mittels einer Oberflächenwiderstandsmessung bestimmt und in einer
15 Messmatrix abgelegt. Das Raster der Messmatrix beträgt dabei 2x2 mm.

- Das Substrat 8 wurde definiert und gerichtet auf dem Substrathalter 7 befestigt, wodurch eine direkte Zuordnung eines jeden Messpunktes der Messmatrix zur X-Achse 6 und Y-Achse 4 (Koordinaten) gegeben ist.
20

Die Ionenaustrittsöffnung 10 der Ionenstrahlquelle 1 hat einen Durchmesser von 40 mm. Der Abstand zwischen Ionenaustrittsöffnung 10 und der Oberfläche 15 des Substrates 8 beträgt etwa 85 mm.

- 25 Nach der Evakuierung der Vakuumkammer und Erreichen der Betriebsbereitschaft der Ionenstrahlquelle 1 wird das Ionensondenarray 9 am Substrathalter 7 in den Ionenstrahl gefahren und die Strahlcharakteristik des Ionenstrahls gemessen und gegebenenfalls entsprechend dem technologi-

schen Erfordernis nachgeregelt. Die Strahlcharakteristik wird dabei beispielsweise so eingestellt, dass bei einer Ionenenergie von ca. 800 eV eine Gauß-Verteilung der Ionenstromdichte mit einer Halbwertsbreite von 12 mm und ein
5 Maximum der Ionenstromdichte von ca. 2.5 mA/cm² erreicht werden.

Mit Hilfe eines Berechnungsprogramms wird zur Erzeugung einer lokal erforderlichen Abtragsrate des Ionenstrahls auf der Oberfläche 15 eine Steuermatrix mit Werten der Puls-
10 frequenz zwischen 500 Hz bis 20kHz und des Pulslängenverhältnisses von 0,2 bis 0,98 in einer Steuereinheit abgelegt. Weiterhin werden für die Bearbeitungsgenauigkeit notwendige gleichförmige Verfahrgeschwindigkeiten und Zeilenabstände in die Steuermatrix eingetragen.

15 Während der Oberflächenbearbeitung wird nun über eine Zeitmatrix in Abhängigkeit der jeweiligen Verfahrgeschwindigkeit der Ionenstrahl vollständig gesperrt oder gepulst. Mit dieser Vorgehensweise wird im Verfahrensablauf eine Planarisierung der Oberfläche 16 (Figur 1b) mit einer
20 Homogenität von kleiner +/-1% bei einer Bearbeitungszeit des Substrates 8 von ca. 10 min erreicht.

Typisch dabei ist, dass das Zielprofil der Oberfläche 16 mit einer Abweichung von kleiner +/-5nm eingestellt wird. Durch ein hocheffektives Rechenprogramm sowie Optimierung
25 der definierten Strahlcharakteristik des Ionenstrahls kann die Genauigkeit der Ionenstrahlbearbeitung noch deutlich weiter gesteigert bzw. die Bearbeitungszeit noch weiter verringert werden.

Die Erfindung kann auf der Grundlage der Ansprüche in einer
30 außerordentlich umfassenden Weise variiert werden. So ist

es ohne weiteres möglich, den Ionenstrahl entsprechend der
Unteransprüche 3 und 7 an die jeweilige Substratanordnung
anzupassen, z.B. kann auch ein relativ breiter Ionenstrahl
für Durchlaufanlagen zur Ionenstrahlbearbeitung zur Verfü-
5 gung gestellt werden.

Ansprüche

1. Verfahren zur Ionenstrahlbearbeitung der Oberfläche
eines Substrates, bei dem das Substrat gegenüber einem
Ionenstrahl, der von einer Ionenstrahlquelle erzeugt
5 wird, positioniert wird, und das bekannte Eigenschafts-
muster der Oberfläche des Substrates durch den Ionen-
strahl partiell derart bearbeitet wird, dass ein neues
technologisch definiertes Eigenschaftsmuster ausge-
bildet wird, **dadurch gekennzeichnet, dass** das aktuelle
10 geometrische Wirkungsmuster des Ionenstrahls auf der
Oberfläche (15) des Substrates (8) in Abhängigkeit des
bekannten Eigenschaftsmusters und des neuen technolo-
gisch definierten Eigenschaftsmusters sowie in Abhän-
gigkeit des Verfahrensfortschrittes durch Veränderung
15 der Strahlcharakteristik und/oder durch Pulsung des
Ionenstrahles eingestellt wird.
2. Verfahren zur Ionenstrahlbearbeitung nach Anspruch 1,
dadurch gekennzeichnet, dass das Substrat (8) und die
Ionenstrahlquelle (1) zueinander rotieren und/oder
20 gleichförmig oder ungleichförmig linear, kreisförmig
oder in einer technologisch vorgegebenen Richtung
bewegt werden.
3. Verfahren zur Ionenstrahlbearbeitung nach Anspruch 1
oder 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Ionenstrahl
25 aus mindestens zwei Einzel-Ionenstrahlen gebildet wird,
deren Strahlcharakteristiken synchron oder unabhängig
voneinander gesteuert und/oder zeitgleich oder zeitlich
versetzt gepulst werden.

4. Verfahren zur Ionenstrahlbearbeitung nach einem der Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Winkel zwischen der Flächennormale der zu bearbeitenden Oberfläche des Substrates und der Achse des auf die Oberfläche auftreffenden Ionenstrahls verändert wird.
5. Verfahren zur Ionenstrahlbearbeitung nach einem der Ansprüche 1 bis 4, **dadurch gekennzeichnet, dass** das aktuelle geometrische Wirkungsmuster des Ionenstrahls auf der Oberfläche (15) des Substrates (8) vor und/oder während des Verfahrensablaufes mittels eines Ionenstrahlarrays (9), welches in der Ebene der zu bearbeitenden Oberfläche (15) des Substrates (8) angeordnet ist, gemessen wird.
6. **Vorrichtung** zur Ionenstrahlbearbeitung der Oberfläche eines Substrates nach einem Verfahren der Ansprüche 2 bis 5, **dadurch gekennzeichnet, dass** das innerhalb einer Vakuumkammer ein Substratträger zur Halterung mindestens eines Substrates (8) vorhanden ist, der in einer Y-Achse (4) und einer X-Achse (6) bewegt werden kann und dass eine Ionenstrahlquelle (1) in der Wand der Vakuumkammer derart gehalten ist, dass die Achse eines Ionenstrahls von der Ionenstrahlquelle (1) senkrecht zur zu bearbeitenden Oberfläche (15) des Substrates (8) in der Z-Achse (11) steht oder in einem zur Z-Achse geneigten Achse angeordnet werden kann, wobei der Abstand der Ionenstrahlquelle (1) von der zu bearbeitenden Oberfläche (15) des Substrates (8) fest oder veränderlich sein kann.

7. Vorrichtung nach Anspruch 6, **dadurch gekennzeichnet,**
dass die Ionenstrahlquelle aus mindestens zwei einzelnen Ionenstrahlquellen gebildet wird, deren einzelne Ionenstrahlen auf der Oberfläche des Substrates ein
5 gemeinsames aktuelles geometrisches Wirkungsmuster des Ionenstrahls ausbilden.